

**PROTECTION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE**

La présente invention concerne un procédé de protection d'une pile à combustible et un circuit d'appoint de pile à combustible pour la mise en oeuvre du procédé de protection.

- 5 La figure 1 représente un exemple d'architecture classique d'un générateur de puissance 10 comprenant une pile à combustible 12. La pile à combustible 12 reçoit un flux d'air d'entrée entraîné par un compresseur 14 à un débit d'entrée  $Q_I$  et rejette un flux d'air d'échappement à un débit de sortie  $Q_O$ .
- 10 La pile à combustible 12 est constituée d'un ensemble de cellules élémentaires (non représentées) agencées en série et peut être représentée, de façon schématique, par un générateur de tension entre deux bornes 16, 17. Une réaction chimique d'électrolyse consommant de l'oxygène fourni par le flux d'air
- 15 d'entrée se produit au niveau de chaque cellule élémentaire. On note  $U_p$  la tension aux bornes 16, 17 de la pile à combustible 12, ou tension de pile, et  $I_p$  le courant fourni par la pile à combustible 12 ou courant de pile. La borne 17 est reliée à un potentiel de référence GND, par exemple la masse, et la borne 16
- 20 est reliée à un noeud E entrée d'un convertisseur de puissance 18. Le convertisseur 18 fournit une puissance  $P_O$  demandée par un utilisateur, appelée par la suite puissance d'utilisateur

Le générateur de puissance 10 comprend un circuit d'appoint 19 comportant une batterie 20 et une diode 22 montées en série. Une borne de la batterie 20 est reliée à l'anode de la diode 22 et l'autre borne est reliée à la masse GND. La cathode de la diode 22 est reliée au noeud E. Le circuit d'appoint 19 fournit un courant  $I_B$  ou courant d'appoint pour assister la pile à combustible 12. La recharge de la batterie 20 est assurée par un chargeur de batterie non représenté.

Le courant total  $I_T$  reçu par le convertisseur de puissance 18, correspond à la somme du courant de pile  $I_P$  et du courant d'appoint  $I_B$ . En fonctionnement normal, la totalité du courant  $I_T$  est fourni par la pile et le courant d'appoint  $I_B$  est nul. Lors de transitoires rapides et importants de la puissance d'utilisateur  $P_O$ , la pile à combustible 12 n'a pas nécessairement la capacité à fournir immédiatement la totalité du courant  $I_T$  demandé. La tension de pile  $U_P$  tend en conséquence à chuter brutalement. La diode D devient alors passante et le circuit d'appoint 19 fournit temporairement un courant d'appoint  $I_B$  pour répondre à la demande de puissance d'utilisateur jusqu'à ce que la pile à combustible est en mesure de fournir la totalité du courant  $I_T$  demandé.

Les figures 2A à 2E représentent plus en détail, à titre d'exemple, l'évolution temporelle de signaux caractéristiques du générateur de puissance 10 de la figure 1 lors d'un transitoire de la puissance d'utilisateur  $P_O$ . Les courbes 25 à 29 représentent respectivement le courant total  $I_T$ , le courant de pile  $I_P$ , la tension de pile  $U_P$ , le débit d'air d'entrée  $Q_I$ , et le taux d'oxygène  $xO_2$  du flux d'air d'échappement. La puissance  $P_O$  est égale successivement à une puissance de ralenti (par exemple 200 watts) pendant 0,1 seconde, au double de la puissance nominale de la pile à combustible 12 (par exemple de 4 kilowatts) pendant une seconde et, enfin, à la puissance nominale de la pile à combustible 12.

Lorsque la puissance d'utilisateur  $P_O$  est égale à la puissance de ralenti, le taux d'oxygène  $xO_2$  est sensiblement

égal à 12%. Ceci correspond à une situation stationnaire pour laquelle le facteur stoechiométrique de consommation d'oxygène de la réaction chimique globale qui a lieu au sein de la pile à combustible 12 est de l'ordre de 2. Le débit d'air d'entrée  $Q_I$  est alors stabilisé pour assurer un tel facteur stoechiométrique. Le courant total  $I_T$  est intégralement fourni par la pile à combustible 12 et la tension de pile  $U_p$  est élevée.

Lorsque la puissance d'utilisateur  $P_0$  passe au double de la puissance nominale, le courant total  $I_T$  augmente brutalement et la tension de la pile  $U_p$  chute brutalement pour se stabiliser à environ 50 volts.

Le compresseur 14 reçoit une consigne de débit d'air d'entrée  $Q_I$  déterminée à partir du courant total  $I_T$ . Toutefois, l'inertie du compresseur 14 entraîne un retard entre le moment où le compresseur reçoit une consigne déterminée et le moment où le compresseur 14 fournit le débit d'air d'entrée  $Q_I$  correspondant à la consigne déterminée. Quelques secondes sont donc nécessaires pour que le débit d'air d'entrée  $Q_I$  augmente.

Juste après que la puissance d'utilisateur  $P_0$  ait augmenté au double de la puissance nominale, la pile à combustible 12 dispose encore d'assez d'air pour fournir la totalité du courant total  $I_T$  pendant une courte période (d'environ 0,1 s). Mais comme le régime du compresseur 14 n'a pas encore augmenté, la pile à combustible 12 reçoit un débit d'air  $Q_I$  sensiblement identique au débit reçu lorsque la puissance d'utilisateur  $P_0$  était égale à la puissance de ralenti. La pile à combustible 12 consomme donc tout l'oxygène dont elle dispose dans son volume interne, ce qui peut être vérifié sur la courbe représentée en figure 2E par la chute du taux d'oxygène  $x_{O_2}$  dans le flux d'air d'échappement. Lorsque le taux  $x_{O_2}$  atteint environ 4%, certaines des cellules de la pile à combustible 12 moins bien alimentées, notamment pour des raisons d'écart géométrique minime à la fabrication, voient leur tension chuter juste en dessous de zéro. De telles cellules sont alors

en inversion de polarité. Ceci provoque une chute supplémentaire de la tension de pile  $U_p$  de sorte que la diode 22 devient passante et permet à la batterie 20 de fournir une partie du courant total  $I_T$ . Le courant fourni par la pile  $I_p$  chute alors et s'équilibre à une valeur double de la valeur correspondant à la puissance de ralenti. Ceci correspond à un facteur stoechiométrique de consommation d'oxygène de la réaction chimique globale au sein de la pile à combustible 21 égal à 1. Sensiblement tout l'oxygène introduit dans la pile à combustible 12 est alors consommé.

Ensuite, à mesure que le régime du compresseur 14 augmente, le débit d'air  $Q_I$  et le courant de pile  $I_p$  augmentent. Pendant toute cette phase, le facteur stoechiométrique de consommation d'oxygène reste égal à 1 et le taux d'oxygène  $xO_2$  inférieur à 4%. Un courant de plus en plus élevé traverse donc les cellules de la pile à combustible 12 qui sont en inversion de polarité. De telles cellules risquent alors d'être endommagées, réduisant ainsi leur durée de vie.

La présente invention vise un procédé de protection d'une pile à combustible, et un circuit d'appoint de pile à combustible pour la mise en oeuvre du procédé de protection, permettant d'éviter le phénomène d'inversion de polarité de cellules de la pile à combustible lors de transitoires de la puissance d'utilisateur.

La présente invention vise également un circuit d'appoint de pile à combustible, pour la mise en oeuvre du procédé de protection, de conception simple, entraînant peu de modifications de l'architecture du générateur de puissance.

Pour atteindre ces objets, la présente invention prévoit un procédé de protection d'une pile à combustible, constituée de cellules élémentaires, fournissant une puissance électrique en réponse à une demande de puissance, un circuit d'appoint étant adapté à fournir une puissance électrique complémentaire pour assister la pile à combustible, consistant à déterminer un paramètre représentatif de la tension minimale

parmi les tensions aux bornes de chaque cellule élémentaire ; et à commander la puissance électrique complémentaire fournie par le circuit d'appoint pour que ladite tension minimale reste supérieure à un seuil déterminé.

5            Selon un mode de réalisation de l'invention, le circuit d'appoint maintient la tension aux bornes de la pile à combustible à partir d'une consigne déterminée à partir dudit paramètre.

10           Selon un mode de réalisation de l'invention, les cellules élémentaires de la pile à combustible sont alimentées en oxygène par un flux d'air d'entrée, la pile à combustible rejetant un flux d'air d'échappement, ledit paramètre étant l'image du taux d'oxygène du flux d'air d'échappement, le circuit d'appoint fournissant une puissance électrique  
15           complémentaire pour que le taux d'oxygène soit supérieur à un seuil déterminé.

            Selon un mode de réalisation de l'invention, ledit paramètre est l'image de la dérivée de la tension aux bornes de la pile à combustible, le circuit d'appoint fournissant une  
20           puissance électrique complémentaire pour que la dérivée de la tension aux bornes de la pile à combustible soit supérieure à un seuil déterminé.

            Selon un mode de réalisation de l'invention, la commande de la puissance électrique complémentaire fournie par  
25           le circuit d'appoint consistant à déterminer un courant image du courant fourni par la pile à combustible ; à filtrer le courant image par un filtre passe-bas ; à fournir un signal de comparaison égal à la somme d'une constante et du courant image filtré multiplié par un coefficient de correction ; et à  
30           commander la puissance électrique complémentaire fournie par le circuit d'appoint de façon que le courant image du courant fourni par la pile à combustible converge vers le signal de comparaison.

            La présente invention prévoit également un dispositif  
35           d'appoint d'une pile à combustible, constituée d'un ensemble de

cellules élémentaires et adaptée à fournir une puissance électrique en réponse à une demande de puissance, ledit dispositif étant adapté à fournir une puissance électrique complémentaire pour assister la pile à combustible, comprenant  
5 un circuit de détermination d'un paramètre représentatif de la tension minimale parmi les tensions aux bornes de chaque cellule élémentaire ; et un circuit de commande de la puissance électrique complémentaire fournie de façon que ladite tension minimale reste strictement positive.

10 Selon un mode de réalisation de l'invention, le dispositif comprend en outre une source de tension ; un circuit de fourniture d'une consigne ; et un circuit hacheur relié à la source de tension, recevant ladite consigne et fixant la tension aux bornes de la pile à combustible à partir de ladite consigne.

15 Selon un mode de réalisation de l'invention, le circuit de fourniture de la consigne comprend un circuit de détermination d'un courant image du courant fourni par la pile à combustible ; un circuit de détermination d'un signal de comparaison égal à la somme d'une constante et du courant image  
20 multiplié par un coefficient de correction ; un circuit de comparaison fournissant un signal d'erreur correspondant à la différence entre le courant image et le signal de comparaison ; et un régulateur fournissant la consigne pour minimiser le signal d'erreur.

25 Selon un mode de réalisation de l'invention, le régulateur est du type intégral ou proportionnel-intégral.

Ces objets, caractéristiques et avantages, ainsi que d'autres de la présente invention seront exposés en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers  
30 faite à titre non-limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

la figure 1, précédemment décrite, représente une architecture classique d'un générateur de puissance à pile à combustible ;

les figures 2A à 2E, précédemment décrites, représentent l'évolution de paramètres caractéristiques du générateur de puissance de la figure 1 lors d'un transitoire de puissance ;

5 la figure 3 représente, de façon schématique, un générateur de puissance à pile à combustible comprenant un exemple de réalisation d'un circuit d'appoint selon l'invention ;

10 la figure 4 représente un exemple d'un signal de commande utilisé par le circuit d'appoint de la figure 3 ;

la figure 5 représente, de façon schématique, un premier mode de réalisation d'un circuit de commande du circuit d'appoint de la figure 3 ;

15 la figure 6 représente un deuxième mode de réalisation du circuit de commande ;

les figures 7A à 7H représentent l'évolution de paramètres caractéristiques du générateur de puissance de la figure 3 lors d'un transitoire de puissance ;

20 la figure 8 représente de façon schématique un troisième mode de réalisation du circuit de commande ; et

la figure 9 représente un exemple de réalisation plus détaillé du circuit de commande de la figure 8.

Sur les différentes figures, de mêmes éléments sont désignés par de mêmes références.

25 Le procédé de protection selon la présente invention consiste à prévoir un circuit d'appoint adapté à assister la pile à combustible 12 avant que certaines cellules élémentaires de la pile à combustible 12 ne soient en inversion de polarité.

30 La figure 3 représente un générateur de puissance 10 similaire au générateur représenté en figure 1, équipé d'un circuit d'appoint 30 selon l'invention. Le circuit d'appoint 30 comporte une inductance 32 montée en série avec la batterie 20 entre la batterie 20 et la diode 22, un condensateur 34 dont une borne est connectée à la cathode de la diode 22 et l'autre borne  
35 est connectée à la masse GND, et un interrupteur commandé 36

dont une borne est connectée à l'anode de la diode 22 et l'autre borne est reliée à la masse GND. L'interrupteur 36, par exemple constitué d'un transistor MOS, est commandé par un signal de commande  $S_C$  fourni par un circuit oscillant 38 (OSC) à partir d'une consigne  $S_0$  fournie par un circuit de commande 40 (COM).  
5 Le circuit constitué de l'interrupteur commandé 36, de l'inductance 32 et du condensateur 34 correspond à un circuit hacheur. Le circuit d'appoint 30 impose donc une tension de pile  $U_p$  qui dépend de la consigne  $S_0$ . On note  $U_{bat}$  et  $I_{bat}$  respectivement la tension aux bornes de la batterie 20 et le  
10 courant fourni par la batterie 20.

La figure 4 représente un exemple d'évolution temporelle du signal de commande  $S_C$ . Il s'agit d'un signal en créneaux de rapport cyclique  $\alpha$ , périodique de période  $T$ , variant  
15 par exemple entre la valeur nulle ("0") et un niveau haut ("1"). La consigne  $S_0$  fournie par le circuit de commande 40 est l'image du rapport cyclique  $\alpha$ . Le circuit oscillant 38 est conçu de façon classique et ne sera pas détaillé d'avantage par la suite. Lorsque le rapport cyclique  $\alpha$  est égal à 0, le circuit d'appoint  
20 30 représenté en figure 3 est sensiblement équivalent au circuit d'appoint 19 représenté en figure 1 étant donné la faible quantité d'énergie stockée dans l'inductance 32 et le condensateur 34 par rapport aux énergies présentes au niveau de la batterie 20 et de la pile à combustible 12.

25 La figure 5 représente de façon schématique un premier mode de réalisation du circuit de commande 40. Le circuit de commande 40 reçoit un courant  $I_{mT}$  image du courant total  $I_T$ , et un courant  $I_{mp}$  image du courant de pile  $I_p$ . Un premier filtre passe-bas 42 (F1) reçoit le courant  $I_{mT}$  et fournit un courant  
30 filtré  $I_{mT}^*$ . Un second filtre passe-bas 44 (F2) reçoit le courant  $I_{mp}$  et fournit un courant filtré  $I_{mp}^*$ . Les filtres 42, 44 permettent de supprimer les variations trop brutales des courants  $I_{mT}$  et  $I_{mp}$ . Un soustracteur 46 fournit un courant  $I_{mg}$  égal à la différence entre les courants  $I_{mT}^*$  et  $I_{mp}^*$ . Le courant  
35  $I_{mg}$  correspond donc à l'image du courant fourni par le circuit



d'appoint 30. Un second soustracteur 48 détermine un signal d'erreur  $\varepsilon$  égal à la différence entre le courant  $I_{mB}$  et un courant de référence  $I_{REF}$ . Un régulateur 50 (PI) du type proportionnel-intégral reçoit le signal d'erreur  $\varepsilon$  fournit la  
5 consigne  $S_0$ .

En choisissant une constante de temps du filtre 42 telle que le retard induit par le filtre 42 corresponde au retard du compresseur 14, le courant  $I_{mT}^*$  est représentatif de la vitesse d'entraînement du compresseur 14. Le courant  $I_{mp}^*$  est  
10 représentatif de l'influence du courant de pile sur la quantité d'oxygène dans la pile à combustible 12. Le courant  $I_{mB}$  est alors représentatif de la quantité d'oxygène présente dans la pile à combustible 12, c'est-à-dire du taux d'oxygène  $xO_2$  dans le flux d'air d'échappement. Le procédé de correction selon le  
15 premier mode de réalisation de l'invention consiste à assurer que le taux d'oxygène  $xO_2$  est toujours supérieur à une quantité de référence, par exemple 10%. Ceci permet d'assurer qu'en aucun cas la tension aux bornes de l'une des cellules élémentaires de la pile à combustible 12 ne chute en dessous de 0 volt.

20 La régulation du circuit de commande 40 est en outre conçue de façon que l'intensité de courant de pile  $I_p$  n'augmente pas trop brutalement et limite donc la pente montante du courant de pile  $I_p$ . De plus, la régulation doit être suffisamment insensible pour éviter la fourniture d'un courant d'appoint  $I_B$   
25 lorsque la variation du courant total  $I_T$  est suffisamment rapide et faible. De telles variations correspondent par exemple à des ondulations basse fréquence pouvant survenir lorsque la tension fournie au client est alternative et monophasée ou à des perturbations, par exemple électromagnétiques, au niveau des  
30 capteurs de courant. En outre, une protection intrinsèque du fonctionnement du circuit d'appoint 40 doit prévenir la fourniture d'un courant d'appoint  $I_B$  si la tension de pile  $U_p$  dépasse un seuil déterminé. Enfin, un courant d'appoint  $I_B$  négatif ne doit pas être fourni en entrée de la pile à  
35 combustible 12.

La figure 6 représente un deuxième exemple de réalisation du circuit de commande 40 selon l'invention. La consigne  $S_0$  est déterminée de façon que le courant  $I_{mp}$  image du courant de pile  $I_p$  ne dépasse jamais une valeur d'état  $\beta I_{mp}^* + I_0$ . Le courant filtré  $I_{mp}^*$  est obtenu à partir de  $I_{mp}$  par un filtre passe-bas, du premier ou du deuxième ordre, avec une constante de temps de l'ordre de quelques dixièmes de secondes. Le courant  $I_0$  correspond à une valeur constante et est l'image du courant fourni par la pile à combustible 12 lorsque le compresseur 14 tourne au ralenti. Le coefficient  $\beta$  est une constante supérieure à 1, par exemple de l'ordre de 1,2. La régulation est obtenue par un régulateur du type proportionnel-intégral.

Le circuit de commande 40 reçoit le courant  $I_{mp}$  à une borne d'entrée IN. Une résistance  $R_0$  relie le point milieu entre la borne d'entrée IN et un noeud J à la masse GND. Le noeud J constitue le point d'entrée d'un premier filtre passe-bas constitué d'une résistance  $R_1$  disposée entre le noeud E et un noeud K et un condensateur  $C_1$  disposé entre le noeud K, et la masse GND. Le noeud J constitue le point d'entrée d'un second filtre passe-bas constitué d'une résistance  $R_2$  disposée entre le noeud J et un noeud L, et d'un condensateur  $C_2$  disposé entre le noeud G et la masse GND. Le noeud K est relié à l'entrée inverseuse (-) d'un amplificateur opérationnel 52 par l'intermédiaire d'une résistance  $R_3$ . Le noeud L est relié à l'entrée non inverseuse (+) de l'amplificateur opérationnel 52 par l'intermédiaire d'une résistance  $R_4$ . Une résistance  $R_5$  est disposée entre l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel 52 et la masse GND. L'amplificateur opérationnel 52 fournit la consigne  $S_0$ . L'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel 52 est reliée à la sortie de l'amplificateur opérationnel 52 par l'intermédiaire d'un condensateur  $C_3$  monté en série avec une résistance  $R_6$ . Le circuit formé par les résistances  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$ , et le condensateur  $C_3$  constitue un régulateur du type ,proportionnel-intégral. Le circuit de

commande 40 inclut un circuit de protection 54 comprenant, montées en série entre le noeud J et l'entrée non inverseuse, une diode  $D_1$ , une résistance  $R_7$ , et une diode  $D_2$ . L'anode de la diode  $D_1$  est reliée au noeud J et l'anode de la diode  $D_2$  est  
5 reliée à l'entrée non inverseuse. Une résistance  $R_8$  relie la cathode de la diode  $D_2$  à la masse GND.

Le premier filtre passe-bas a une bande passante de quelques dizaines de hertz pour permettre une plus grande robustesse du circuit de commande 40. En outre, un tel filtre  
10 n'est pas gênant tant que le temps de réaction de la régulation de la tension  $U_p$  est inférieur au temps que met la réserve d'oxygène à diminuer dans la pile à combustible 12 (qui est généralement égal à quelques dizaines de millisecondes).

A titre d'exemple, pour un courant de pile  $I_p$  variant  
15 entre 0 et 100 ampères, le courant  $I_{mp}$  peut varier sensiblement entre 4 et 20 milliampères. La valeur non nulle du courant  $I_{mp}$  associé à la valeur nulle du courant de pile  $I_p$  permet d'obtenir la constante  $I_0$  de la régulation. Le coefficient  $\beta$  est fixé par la résistance  $R_4$ . A titre d'exemple, l'amplificateur  
20 opérationnel fournit une consigne  $S_0$  variant entre 0 à 5 volts, pour la fourniture d'une tension de pile  $U_p$  variant entre 45 et 90 volts. A titre d'exemple, pour obtenir une telle régulation, les résistances  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$ ,  $R_7$  et  $R_8$  sont respectivement égales à 250 ohms, 4,7 kilohms, 4,7 kilohms, 22  
25 kilohms, 100 kilohms, 47 kilohms, 100 kilohms, 1 kilohms et 10 kilohms. Les condensateurs  $C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$  ont respectivement des capacités égales à 100 microfarads, 2,2 microfarads et 22 nanofarads. L'amplificateur opérationnel 52 est du type IM6142. Les diodes  $D_1$ ,  $D_2$  sont par exemple du type 1N4148.

30 Lorsque la tension de pile qui serait obtenue avec un signal de commande  $S_C$  donné est inférieure à la tension réelle de la pile  $U_p$ , le circuit d'appoint 30 ne peut pas effectivement fournir la tension correspondant au signal de commande  $S_C$ . Un tel cas correspond au régime stationnaire, pour lequel la valeur  
35 du rapport cyclique doit être strictement égale à zéro.

Lorsque le circuit d'appoint 30 assiste la pile à combustible 12, la tension de pile  $U_p$  obtenue par la régulation ne doit pas, de préférence, augmenter trop lentement. On maintient donc le niveau minimum de la tension de pile  $U_p$  obtenue par la régulation à une valeur un peu inférieure à la tension moyenne de la pile. On prévoit donc une saturation de la tension de pile  $U_p$  obtenue par la régulation à une valeur minimale largement supérieure à 0, par exemple à 45 volts.

Le circuit de protection 54 permet d'accélérer la diminution de la consigne  $S_0$  lorsque le courant  $I_{mp}$  diminue brutalement pour éviter de réinjecter du courant dans la pile à combustible 12.

Les figures 7A à 7H représentent des courbes 60 à 67 représentatives de l'évolution temporelle respectivement du courant total  $I_T$ , du courant de pile  $I_p$ , de la tension de pile  $U_p$ , du débit d'air d'entrée  $Q_I$ , du taux d'oxygène  $xO_2$  dans le flux d'air d'échappement, du courant du circuit d'appoint  $I_B$ , de la tension de batterie  $U_{bat}$  et du courant de batterie  $I_{bat}$  pour le même transitoire de puissance qu'aux figures 2A à 2E avec le circuit de commande 30 de la figure 6.

Au moment où la puissance d'utilisateur passe d'un niveau de ralenti au double de la puissance nominale, la pile à combustible 12 commence à fournir pendant un très court instant la quasi-totalité du courant total  $I_T$  demandé en consommant l'oxygène qu'elle contient. Le circuit d'appoint 30 fournit alors presque aussitôt l'essentiel du courant total  $I_T$ . Le courant de pile  $I_p$  chute donc brutalement et augmente ensuite lentement au fur et à mesure que la vitesse du compresseur 14 augmente. Le procédé de protection selon l'invention permet donc bien de limiter la chute du taux d'oxygène  $xO_2$ , et donc des tensions aux bornes des cellules élémentaires de la pile à combustible 12. On évite ainsi une détérioration de cellules de la pile à combustible 12.

La figure 8 illustre, de façon schématique, un troisième mode de réalisation du circuit de commande 40 dans

lequel la régulation assure que la dérivée de la tension de pile  $U_p$  est toujours supérieure à un seuil déterminé  $U_{REF}'$ . On prévient ainsi une diminution brutale de la tension de pile  $U_p$ , qui est un bon indicateur signalant le risque que les tensions aux bornes de certaines des cellules élémentaires de la pile à combustible 12 diminuent en dessous de zéro. Le risque de détérioration de cellules de la pile à combustible 12 est ainsi réduit.

La borne d'entrée IN du circuit de commande 40 reçoit une tension  $U_p$  image de la tension de pile  $U_p$ . La tension  $U_p$  est fournie à un filtre passe bas 68 (F), par exemple un filtre du premier ordre. Un dérivateur 70 (D/DT) reçoit la sortie du filtre passe bas 68 et fournit un signal  $U_p'$  image de la dérivée de la tension de pile  $U_p$ . Un soustracteur 72 fournit un signal d'erreur  $\varepsilon$  \* égal à la différence entre le signal  $U_p'$  et le seuil de référence  $U_{REF}'$  à un régulateur 74, par exemple du type proportionnel intégral, qui fournit la consigne  $S_0$ .

La figure 9 représente un exemple plus détaillé de mise en oeuvre du circuit de commande 40 de la figure 8. La borne d'entrée IN recevant la tension  $U_p$  correspond à l'entrée d'un filtre passe-bas constitué d'une résistance  $R_9$  connecté entre la borne d'entrée IN et un noeud M, et un condensateur  $C_4$  relié entre le noeud M et la masse GND. Un dérivateur est formé par un condensateur  $C_5$  connecté entre le noeud M et l'entrée inverseuse (-) d'un amplificateur opérationnel 76. Une résistance  $R_{10}$  est connectée entre l'entrée inverseuse et un potentiel déterminé  $U_D$ . L'entrée non inverseuse (+) de l'amplificateur opérationnel 76 est connectée à la masse GND. Le régulateur est, dans le présent exemple, du type intégral pur et comprend un condensateur  $C_6$  connecté entre l'entrée inverseuse et la sortie de l'amplificateur opérationnel 76. L'amplificateur opérationnel 76 fournit la consigne  $S_0$ . Deux diodes en série  $D_3$ ,  $D_4$  sont connectées en parallèle avec le condensateur  $C_6$ . L'anode de la diode  $D_3$  est reliée à l'entrée inverseuse de

l'amplificateur opérationnel 76 et la cathode de la diode D<sub>4</sub> est reliée à la sortie de l'amplificateur opérationnel 76.

La résistance R<sub>7</sub> permet le réglage du seuil U<sub>REF</sub>'. Les diodes D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub> permettent d'imposer une valeur légèrement inférieure à 0 (ici -1.2 volt environ) pour saturation de l'intégrale du régulateur. Cette intégrale franchira rapidement la valeur nulle au moment d'un transitoire pour plus de rapidité (sinon cette intégrale sature à la tension négative d'alimentation de l'amplificateur opérationnel 76, bien en dessous de 0 volt).

La présente invention prévoit un procédé de protection d'une pile à combustible d'un générateur de puissance qui permet de réguler la puissance fournie par la pile à combustible de façon à éviter la détérioration des cellules élémentaires constituant la pile à combustible.

Bien entendu, la présente invention est susceptible de diverses variantes et modifications qui apparaîtront à l'homme de l'art. En particulier, la batterie du circuit d'appoint peut être remplacée par un accumulateur, un ensemble de condensateurs, un supercondensateur, etc...

**REVENDICATIONS**

1. Procédé de protection d'une pile à combustible (12), constituée de cellules élémentaires, fournissant une puissance électrique en réponse à une demande de puissance, un circuit d'appoint (30) étant adapté à fournir une  
5 puissance électrique complémentaire pour assister la pile à combustible, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :
- déterminer un paramètre représentatif de la tension minimale parmi les tensions aux bornes de chaque cellule  
10 élémentaire ; et
  - commander la puissance électrique complémentaire fournie par le circuit d'appoint pour que ladite tension minimale reste supérieure à un seuil déterminé.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel le  
15 circuit d'appoint (30) maintient la tension aux bornes (16, 17) de la pile à combustible (12) à partir d'une consigne ( $S_0$ ) déterminée à partir dudit paramètre.
3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les cellules élémentaires de la pile à combustible (12) sont  
20 alimentées en oxygène par un flux d'air d'entrée, la pile à combustible rejetant un flux d'air d'échappement, ledit paramètre étant l'image du taux d'oxygène ( $xO_2$ ) du flux d'air d'échappement, le circuit d'appoint (30) fournissant une puissance électrique complémentaire pour que le taux d'oxygène  
25 soit supérieur à un seuil déterminé.
4. Procédé selon la revendication 1, dans lequel ledit paramètre est l'image de la dérivée de la tension aux bornes (16, 17) de la pile à combustible (12), le circuit d'appoint (30) fournissant une puissance électrique complémentaire pour  
30 que la dérivée de la tension aux bornes de la pile à combustible soit supérieure à un seuil déterminé.
5. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la commande de la puissance électrique complémentaire fournie par le circuit d'appoint (30) comprend les étapes suivantes :

- déterminer un courant ( $I_{mp}$ ) image du courant ( $I_p$ ) fourni par la pile à combustible (12) ;
  - filtrer le courant image par un filtre passe-bas ;
  - fournir un signal de comparaison égal à la somme  
5 d'une constante ( $I_0$ ) et du courant image filtré multiplié par un coefficient de correction ( $\beta$ ) ;
  - commander la puissance électrique complémentaire fournie par le circuit d'appoint (30) de façon que le courant image du courant fourni par la pile à combustible converge vers  
10 le signal de comparaison.
6. Dispositif d'appoint (30) d'une pile à combustible (12), constituée d'un ensemble de cellules élémentaires et adaptée à fournir une puissance électrique en réponse à une demande de puissance, ledit dispositif étant adapté à fournir  
15 une puissance électrique complémentaire pour assister la pile à combustible, caractérisé en ce qu'il comprend :
- un circuit de détermination d'un paramètre représentatif de la tension minimale parmi les tensions aux bornes de chaque cellule élémentaire ; et
  - 20 - un circuit de commande de la puissance électrique complémentaire fournie de façon que ladite tension minimale reste strictement positive.
7. Dispositif selon la revendication 6, comprenant en outre :
- 25 - une source de tension (20) ;
  - un circuit de fourniture d'une consigne ( $S_0$ ) ;
  - un circuit hacheur relié à la source de tension, recevant ladite consigne et fixant la tension aux bornes (16, 17) de la pile à combustible à partir de ladite consigne.
- 30 8. Dispositif selon la revendication 7, dans lequel le circuit de fourniture de la consigne ( $S_0$ ) comprend :
- un circuit de détermination d'un courant image ( $I_{mp}$ ) du courant ( $I_p$ ) fourni par la pile à combustible (12) ;



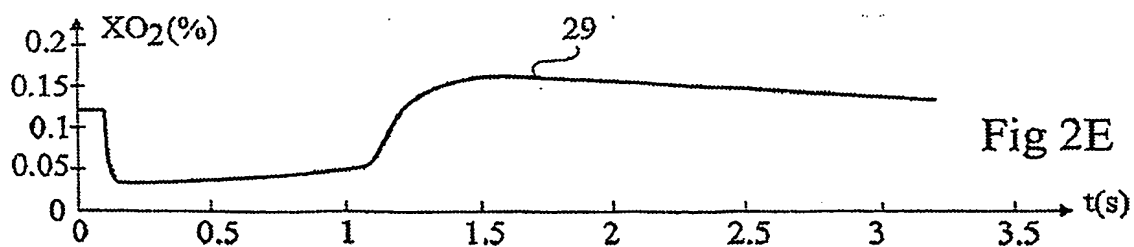
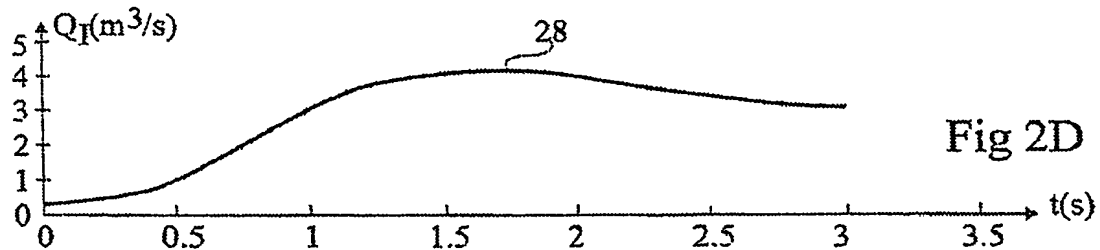
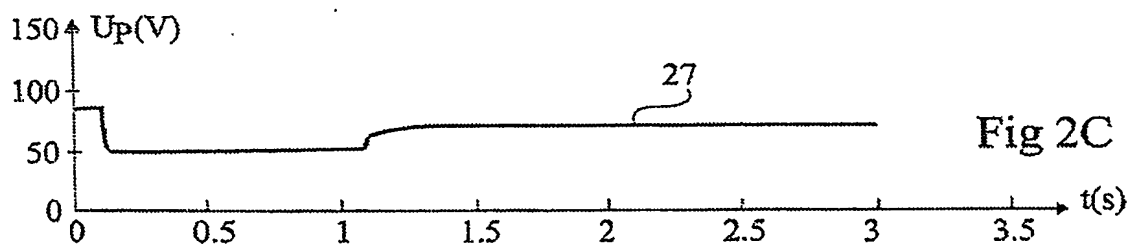
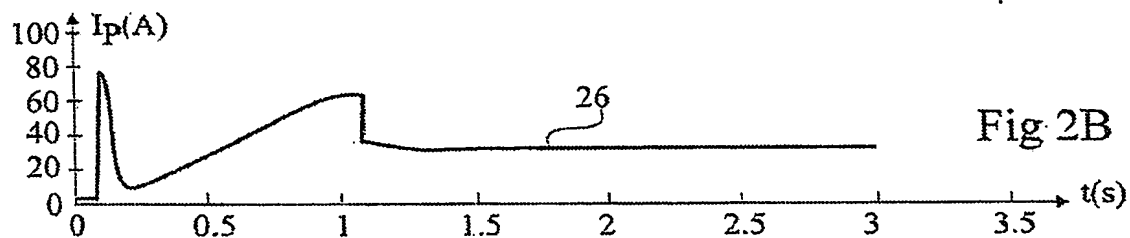
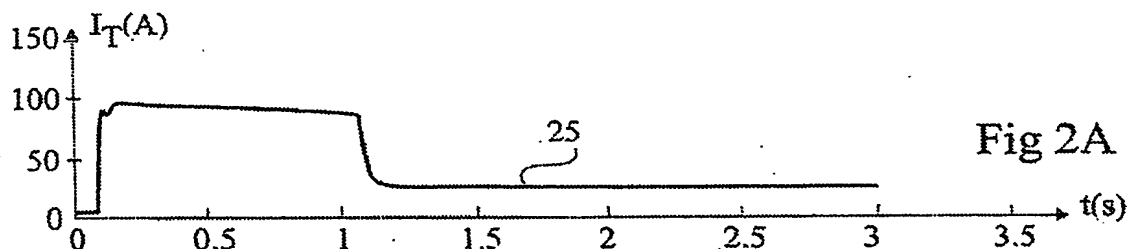
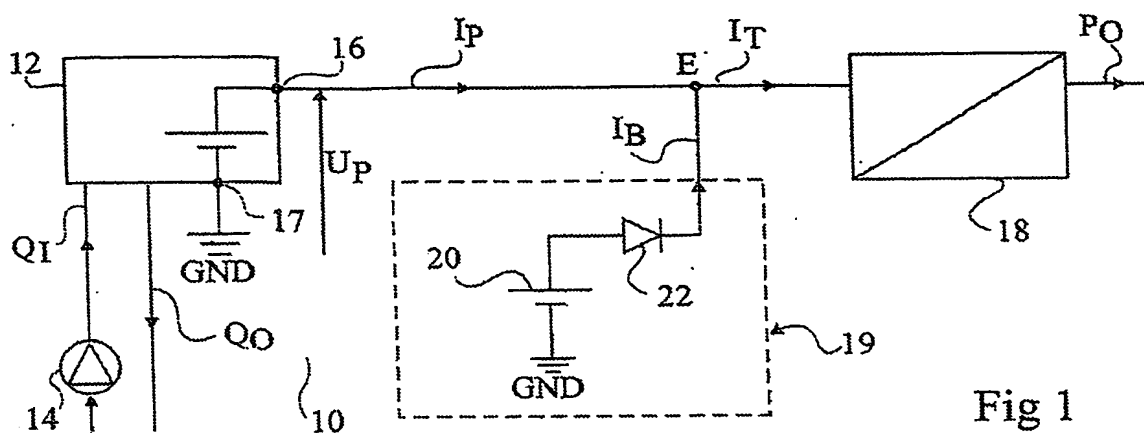
- un circuit de détermination d'un signal de comparaison égal à la somme d'une constante ( $I_0$ ) et du courant image multiplié par un coefficient de correction ( $\beta$ ) ;

- un circuit de comparaison fournissant un signal  
5 d'erreur ( $\epsilon$ ) correspondant à la différence entre le courant image et le signal de comparaison ; et

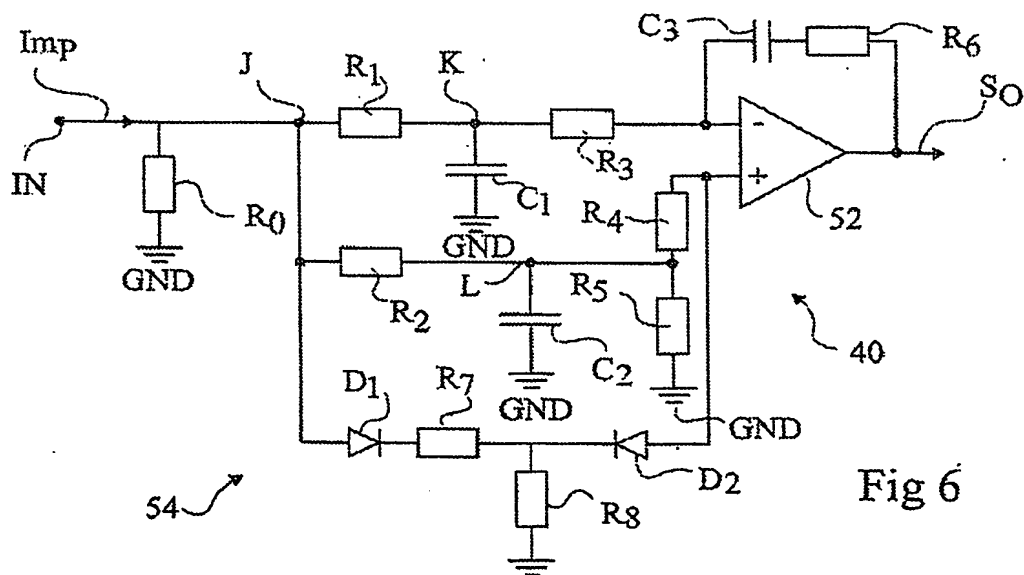
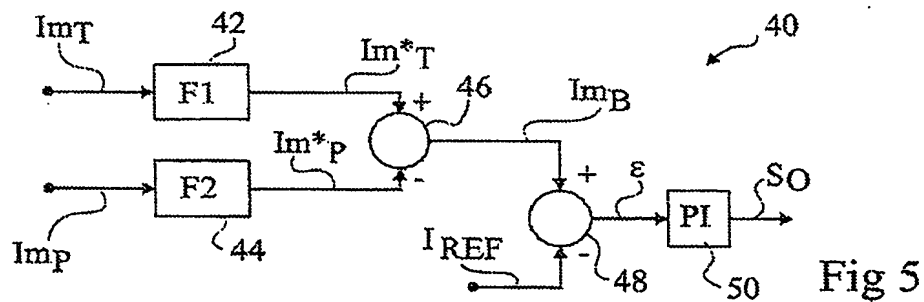
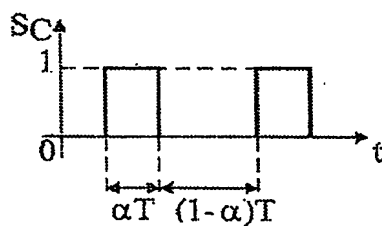
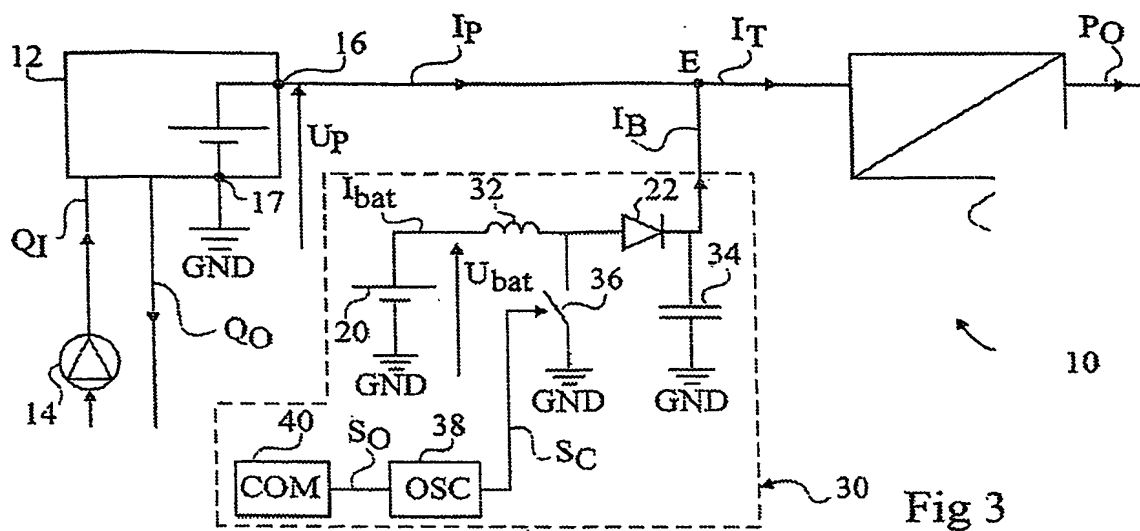
- un régulateur fournissant la consigne pour minimiser le signal d'erreur.

9. Dispositif selon la revendication 9, dans lequel le  
10 régulateur est du type intégral ou proportionnel-intégral.

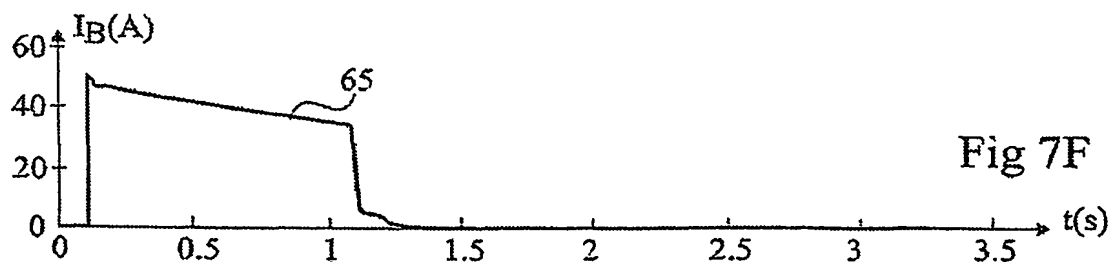
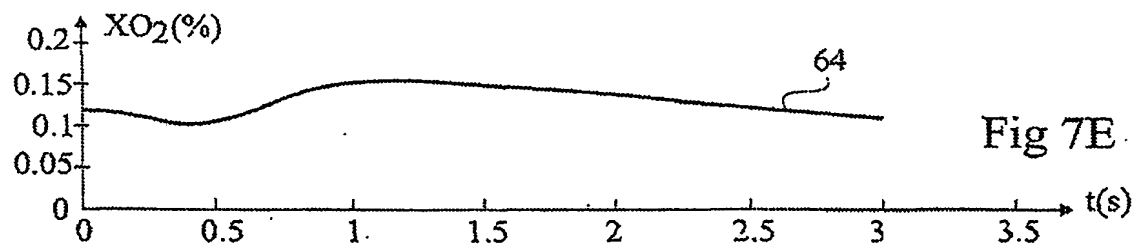
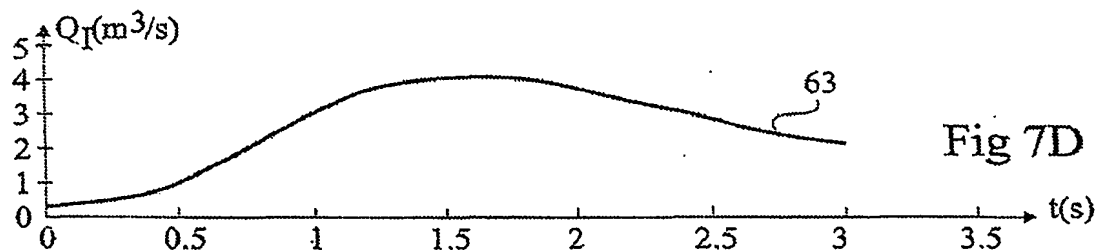
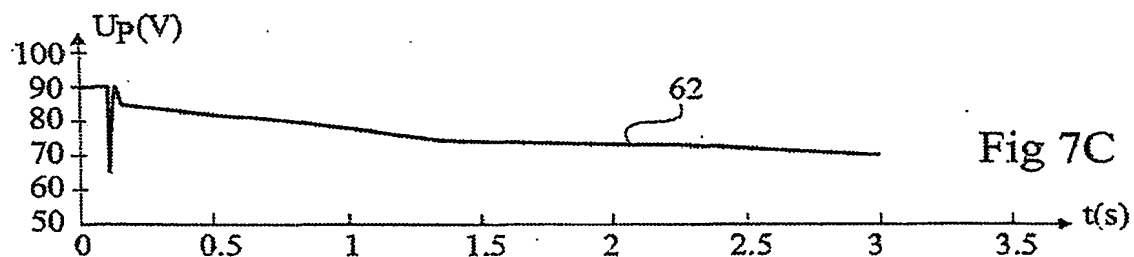
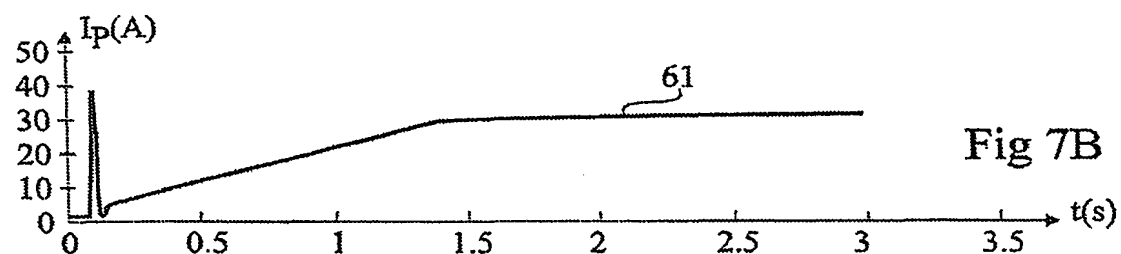
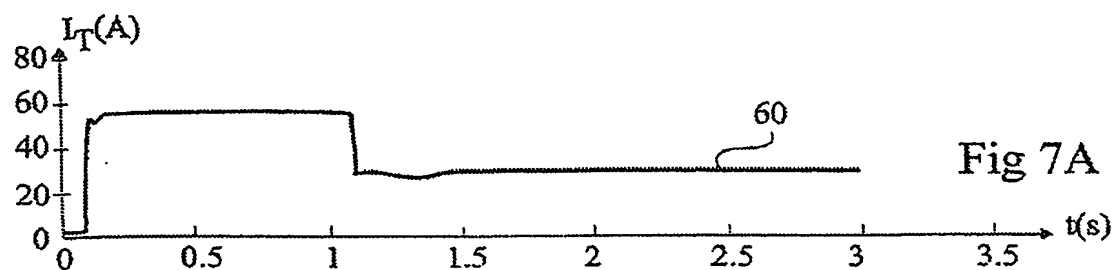
1/4



2/4



3/4



4/4

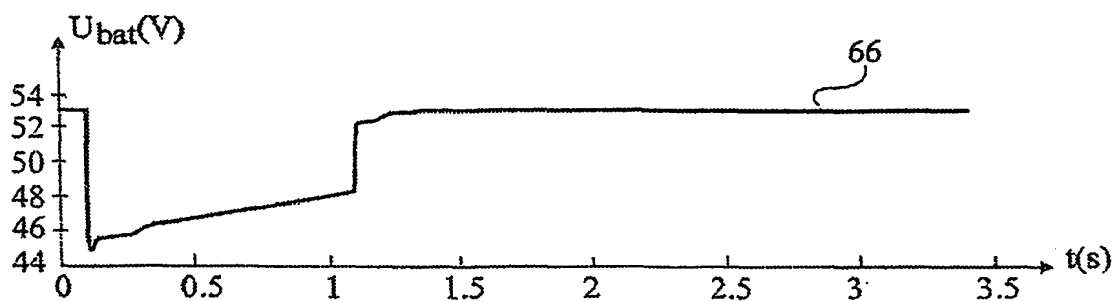


Fig 7G

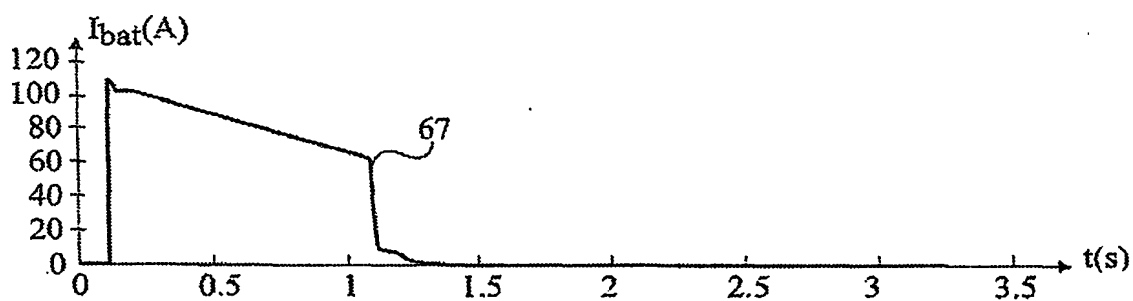


Fig 7H

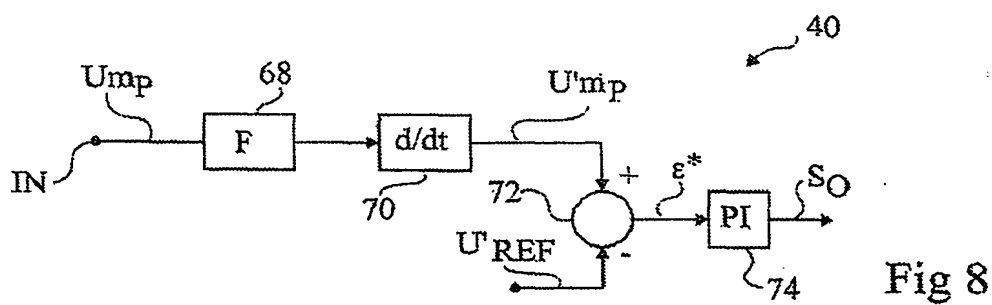


Fig 8

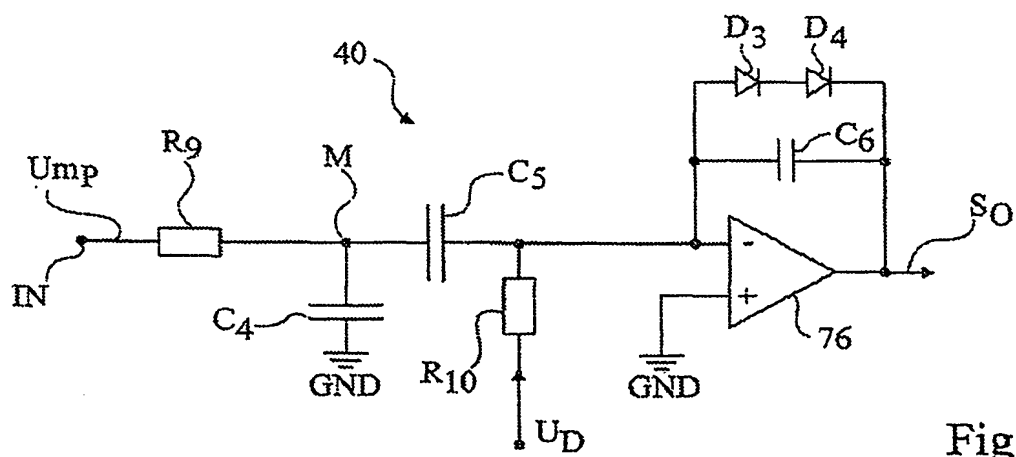


Fig 9